

Szerves folyadékokkal telített talajok hidraulikus vezetőképessége. II. A becslés lehetőségei

MAKÓ ANDRÁS

Pannon Agrártudományi Egyetem, Keszthely

A talajokat szennyező szerves és szervetlen anyagok vándorlását, térbeli elterjedését és esetleges átalakulásait leíró matematikai modelleknek, számítógépes szimulációs rendszereknek (HEIJDE, 1994) általában lényeges input paramétere a talajok vagy egyes talajrétegek hidraulikus vezetőképessége. A vízzel telített talaj hidraulikus vezetőképessége jól tükrözi a talaj szerkezeti állapotát, pórusviszonyait, vízgazdálkodási tulajdonságait, és egyfajta maximumát jelenti a különböző víztelítettségű talajokban mérhető kapilláris vezetőképesség értékeknek. A vízben oldható szennyeződések beszívargása és vándorlása szorosan kapcsolódik a folyadékfázis áramlási sebességéhez. A legtöbb esetben azonban - megfelelő kísérleti adatok hiányában - a vízben oldhatatlan, önálló folyadékként mozgó szerves vegyületek vándorlási sebességének becslésére is a vízzel telített talajok vízzel mért hidraulikus vezetőképességi értékeit használják (CONCAWE, 1979; WEAVER et al., 1994; HEIJDE, 1994).

A hidraulikus vezetőképesség mérhető szabadföldi körülmények között és laboratóriumban (KLUTE, 1965; VÁRALLYAY, 1973, 1993; HEAD, 1984; KLUTE & DIRKSEN, 1986). A szennyeződések vándorlását leíró modellek egy része azonban a talajok egyéb - laboratóriumi körülmények között könnyebben mérhető - fizikai paramétereit felhasználva különböző becslési módokat alkalmaz (a konkrét mérések helyett) a vízzel telített talajok hidraulikus vezetőképességének számítására.

Mivel az ilyesfajta becslések csak bizonyos határok között érvényesek, statisztikai módszerekkel vizsgáltuk alkalmazhatóságukat különféle fizikai féleségű, agyagásvány minőségű, humusztartalmú és tömördöttségű talajminták és különféle folyadékok esetében. A vizsgálatokba vont talajminták és folyadékok részletes jellemzését, a hidraulikus vezetőképesség mérési körülményeinek és az eredmények ismertetését, valamint az eredmények összehasonlító statisztikai vizsgálatát előző közleményeinkben mutattuk be (MAKÓ et al., 1995, MAKÓ, 1995). Most ismertetésre kerülő vizsgálatainkban - amelyeket az F 013155 OTKA téma keretében végeztünk - a talajok mechanikai összetételének a hidraulikus vezetőképességgel való regressziós kapcsolatát tanulmányoztuk és

összehasonlítottuk az irodalomban talált - a becslésekhez felhasznált - összefüggésekkel. Vizsgáltuk továbbá a különböző folyadékokra mért és a szakirodalom által becsült hidraulikus vezetőképességi értékek kapcsolatát.

Eljárások kétfázisú talajok hidraulikus vezetőképességének becslésére

A - Darcy-törvényből levezethető - hidraulikus vezetőképesség (K) a talajok és a talajokon átszivárgó folyadékok tulajdonságainak együttes függvénye. Elméletileg lehetséges a hidraulikus vezetőképesség két tényezőre történő felbontása: a talajok tényleges áteresztőképességére (k) és a folyadékok cseppfolyóságára (f) (HILLEL, 1971):

$$K = k \cdot f \quad (1)$$

Ennek a két tényezőnek a hatását írja le többek között a széles körben használt Kozeny-Carman egyenlet is (KOZENY, 1927; CARMAN, 1956):

$$K = k \cdot g \cdot \gamma / \mu = \left(\left(1 / K_0 \cdot T^2 \cdot S_0^2 \right) \cdot \left(n^3 / (1-n)^2 \right) \right) \cdot g \cdot \gamma / \mu \quad (2)$$

ahol. k_0 : a pórusok alakjától függő állandó (átlagosan 2,5); T : a folyadékcsatornák kanyarulatosságától függő állandó (az olyan porózus rendszerekben, ahol a pórusok méretei közelítően egyformák, átlagosan $(\sqrt{2})$); S_0 : a talajszemcsék fajlagos felülete; n : a talaj porozitása; γ : az átszivárgó folyadék fajlagos tömege; μ : az átszivárgó folyadék dinamikus viszkozitása; g : a nehézségi gyorsulás.

A Kozeny-Carman egyenlet ideális porózus rendszereket feltételez (vagyis közel egyforma méretű pórusokat), illetve, hogy az áramló folyadék és a porózus közeg között semmiféle fizikai-kémiai kölcsönhatás nem lép fel. A fentiekből következik, hogy az egyenlőség viszonylag jól alkalmazható durvább fizikai féleségű (homok) talajoknál, ám általában a mért és az egyenlettel becsült hidraulikus vezetőképesség értékek jelentősen eltérnek egymástól. Ennek oka lehet a talajok szilárd fázisának polidiszperz volta, illetve a talajok szerkezeti elemeinek kialakulása, aminek következményeként egyidejűleg különböző méretű pórusok találhatók a talajokban (OLSEN, 1962; HILLEL, 1971; BEAR, 1979). A telített talajok szilárd és folyadékfázisa sem tekinthető állandónak. Az átszivárgó folyadék kölcsönhatásba lépve a szilárd fázissal jelentősen megváltoztathatja a pórusviszonyokat. Az erre vonatkozó kutatásokat röviden előző közleményünkben foglaltuk össze (MAKÓ, 1995). Amint fellépnek különböző fázis-kölcsönhatások a talajokban, az egyenlettel becsült és a mérhető hidraulikus vezetőképesség értékek között jelentős eltérések tapasztalhatók.

A Kozeny-Carman egyenlet alapján - feltételezve annak érvényességét, vagyis, hogy k (a tényleges áteresztőképesség) értéke az átszivárgó folyadékok minőségétől független, adott talajra állandó - becsülhető a talajok hidraulikus vezetőképessége víztől eltérő folyadékokra:

$$k = K_o \cdot g \cdot \mu_o / \gamma_o = K_v \cdot g \cdot \mu_v / \gamma_v \quad (3)$$

$$K_o = K_v \cdot (\mu_v \cdot \gamma_o) / (\mu_o \cdot \gamma_v) \quad (4)$$

ahol K_o és K_v a talaj hidraulikus vezetőképessége víztől eltérő folyadékra, illetve a vízre; μ_v és γ_v a víz dinamikus viszkozitása és fajlagos tömege; μ_o és γ_o a víztől eltérő folyadék dinamikus viszkozitása és fajlagos tömege.

Gyakorlatilag az általunk ismert legtöbb - a víztől eltérő, azzal nem elegyedő szennyező folyadék mozgását leíró - modell a hidraulikus vezetőképesség becslésére ezt az egyenlőséget alkalmazza (CONCAWE, 1979; KESSLER & RUBIN, 1987; TESTA & WINEGARDNER, 1991; WEAVER et al., 1994), holott ennek az összefüggésnek az érvényessége sem terjed túl a Kozeny-Carman egyenlet érvényességi tartományán.

A vízzel telített talajok hidraulikus vezetőképességének meghatározása drága és időigényes eljárás. Ezért az egyes modellekben gyakran különböző, morfológiai vagy más könnyen meghatározható talajtulajdonságokon alapuló becslési módszereket alkalmaznak. Ezek a becslések a hidraulikus vezetőképességre nem adnak ugyan túlságosan pontos eredményeket, ám a modellek pontosságának sok esetben megfelelnek.

ANDERSON & BOUMA (1973), illetve BOUMA és munkatársai (1979) az agyagos talajok mikromorfometriai adatai (a pórusok mérete és alakja) alapján próbálták becsülni azok hidraulikus vezetőképességét. KING & FRANZMEIER (1981) a talajok genetikai és morfológiai adatainak hidraulikus vezetőképességükkel való összefüggését vizsgálták. MCKEAGUE és munkatársai (1982) a hidraulikus vezetőképesség szempontjából osztályozták a talajokat azok szerkezete, porozitása, mechanikai összetétele, konzisztenciája és fajlagos tömege alapján.

A különböző talajok agyag- és porfrakciójának a hidraulikus vezetőképességgel való kapcsolatát CAMPBELL & CAMPBELL (1982) az alábbi típusú exponenciális függvénnyel jellemezte:

$$K = a \cdot \exp(b \cdot (PC + PL) / 100) \quad (5)$$

ahol: a és b konstansok; PC és PL az agyag- és porfrakció százalékos mennyisége a talajban.

CAMPBELL (1985) szerint az alábbi összefüggések jobban jellemzik a kapcsolatot:

$$K = a \cdot \exp((b \cdot PC / 100) + (c \cdot PL / 100)) \quad (6)$$

$$K = a \cdot d \cdot \exp((b \cdot PC / 100) + (c \cdot PL / 100)) \quad (7)$$

ahol a , b , c tapasztalati konstansok; d konstans értéke pedig a talajok térfogat-tömegével arányos.

PUCKETT és munkatársai (1985) szintén vizsgálták a talajok könnyen mérhető fizikai paraméterei és a hidraulikus vezetőképesség összefüggéseit. Azt tapasztalták, hogy bár az egy- és többtényezős lineáris regresszió analízisek eredményeként kapott egyenlőségek nagy korrelációs koefficiensei szoros kapcsolatot mutattak a vezetőképesség és a talajparaméterek között, a becslések sok esetben irreális, negatív hidraulikus vezetőképesség értékeket eredményeztek. A legjobb becslést a nemlineáris regressziós eljárás eredményezte. Azt tapasztalták továbbá, hogy bár a talajok térfogattömegének és porozitásának hatása a hidraulikus vezetőképességre statisztikailag egyértelműen igazolható volt, ezek a talajparaméterek - korrelációs koefficiensük értéke alapján - a regressziós összefüggésekbe nem voltak bevonhatóak. A hidraulikus vezetőképesség becslésére a talajok agyagtartalmát találták a legalkalmasabbnak. A kapcsolatot az alábbi típusú exponenciális függvényvel írták le:

$$K = a \cdot \exp(b \cdot PC) \quad (8)$$

ahol a és b konstansok; PC agyagfrakció százalékos mennyisége a talajban.

A hidraulikus vezetőképesség és az agyagtartalom közötti szoros korrelációt figyelték meg BENSON és munkatársai (1994) különböző tömörített földszigeteléseknél is. Statisztikai elemzéseik szerint a vezetőképesség az agyagtartalom változására jóval nagyobb érzékenységet mutatott, mint a többi részecskefrakció változására.

A hidraulikus vezetőképességéhez hasonlóan a talajok nedvességének energiaállapot görbéje is a talajok néhány egyszerűen mérhető tulajdonságától függ. Ilyen tulajdonságok a talaj szemcse- és pórusméret eloszlása, a homok-, por- és agyagfrakció százalékos aránya. Összefüggések találhatók a hidraulikus vezetőképesség és a talajnedvesség energiaállapot görbéjét leíró paraméterek között, mely összefüggések a különféle modellekben a vezetőképesség becslésére jól használhatók (BRAKENSIEK et al., 1981; RAWLS & BRAKENSIEK, 1985; CARSEL & PARRISH, 1988; WEAVER et al., 1994).

Anyag és módszer

Vizsgálataink első részében a különböző talaj- és ásványi mintákon, valamint az ezekből készített talajkeveréksorok mintáin desztillált vízzel mért hidraulikus vezetőképesség értékek (MAKÓ, 1995) és a minták mechanikai összetételének kapcsolatát vizsgáltuk. A kétféle talajkeveréksoron külön-külön és összevonva, valamint a talaj- és ásványi őrlemény minták csoportjában - a (8), (5) és (6) linearizált alakját használva - lineáris regresszió-analízissel tanulmányoztuk a mintákra jellemző agyag- és porfrakció mennyiségének hatását azok hidraulikus vezetőképességére.

A regressziós egyenletek alapján becsülhető értékeket összehasonlítottuk az eredetileg mért hidraulikus vezetőképesség értékekkel. A mérhető vezetőképesség értékeket összehasonlítottuk továbbá azokkal az értékekkel, melyeket a fenti összefüggések nemlineáris regresszió-analízissel parametrizált egyenletei alapján becsültünk.

A továbbiakban összehasonlítottuk a talajkeveréksorokon és a talaj- és ásványi őrlemény mintákon a különböző szerves folyadékokkal mért hidraulikus vezetőképesség értékeket a (4) alapján becsülhető értékekkel. Vizsgáltuk továbbá a hidraulikus vezetőképesség és a mechanikai összetétel (8), (5) és (6) típusú kapcsolatát a szerves folyadékok esetében.

Végezetül - kovariancia-analízis segítségével - a hidraulikus vezetőképességet befolyásoló egyéb paraméterek és a minták mechanikai összetételének a vezetőképességre való együttes hatását tanulmányoztuk.

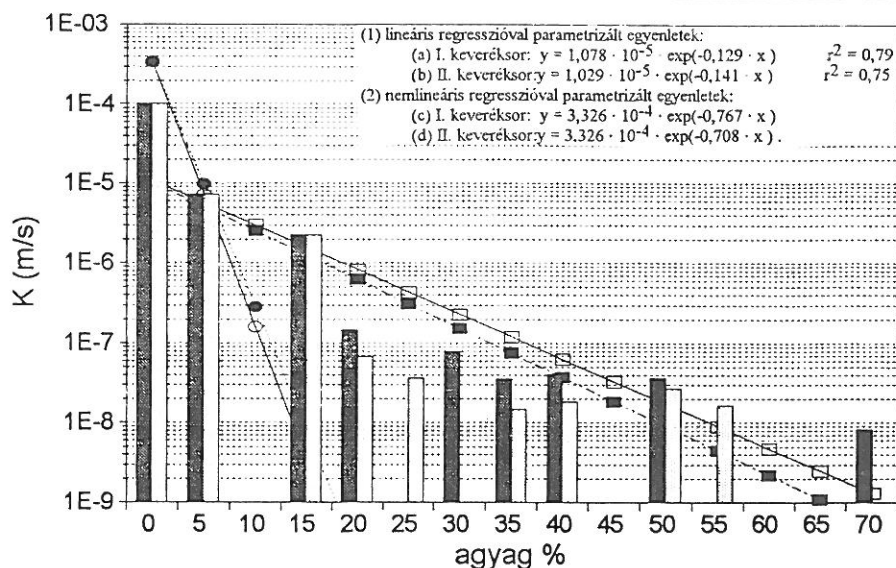
Statisztikai elemzéseinkhez az SPSS/PC+V3.0 (1988) számítógépes programcsomagot használtuk.

Az eredmények ismertetése

A desztillált vízzel mért hidraulikus vezetőképesség értékek és a (8), (5) és (6) alapján lineáris, illetve nemlineáris regresszióval becsülhető értékek összehasonlítása (1-6. ábra) azt mutatta, hogy a fenti összefüggések csak a hidraulikus vezetőképesség durva becslésére alkalmasak. Általában a lineáris regresszióval történő becslés az alacsonyabb vezetőképességű talajokra (10^{-9} - 10^{-6} m/s) ad a mérhetőhöz közelebbi értékeket, míg a nagyobb vezetőképességű talajoknál (10^{-6} - 10^{-4} m/s) a mérhetőnél alacsonyabb értékeket kapunk. A nemlineáris regresszió ezzel szemben inkább a 10^{-6} m/s-nál nagyobb vezetőképességű talajok vezetőképességének becslésére alkalmas.

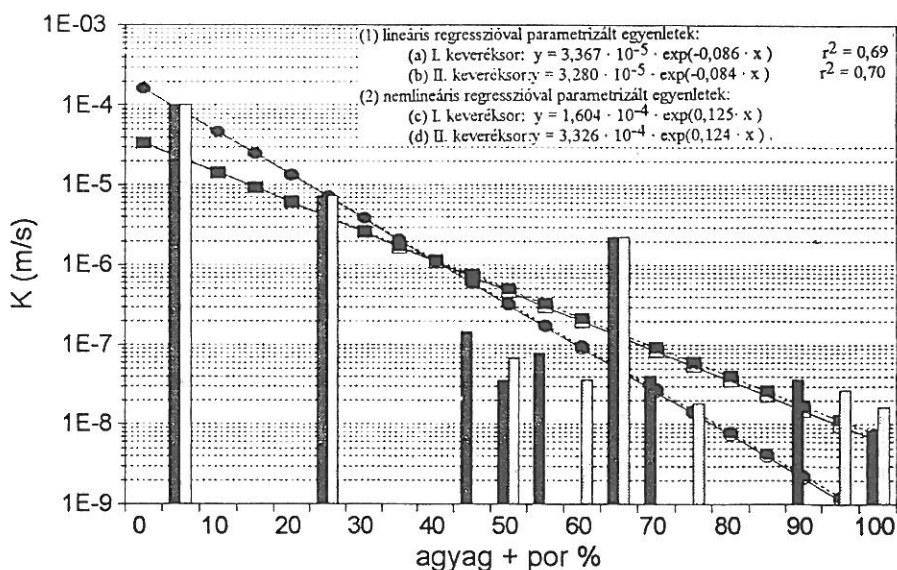
Ezt a tapasztalatunkat alátámasztják PUCKETT és munkatársai (1985) eredményei is. A szerzők (8) alapján a nemlineáris regressziós eljárással a hidraulikus vezetőképességre jobb becslést kaptak, mint a lineáris regresszióval. A vizsgált minták jórészen 10^{-6} m/s-nál nagyobb vezetőképesség volt mérhető.

Valamennyi mintacsoportban a (6) alapján parametrizált regressziós görbék adták a legjobb becslést, mind a lineáris regresszió, mind a nemlineáris reg-



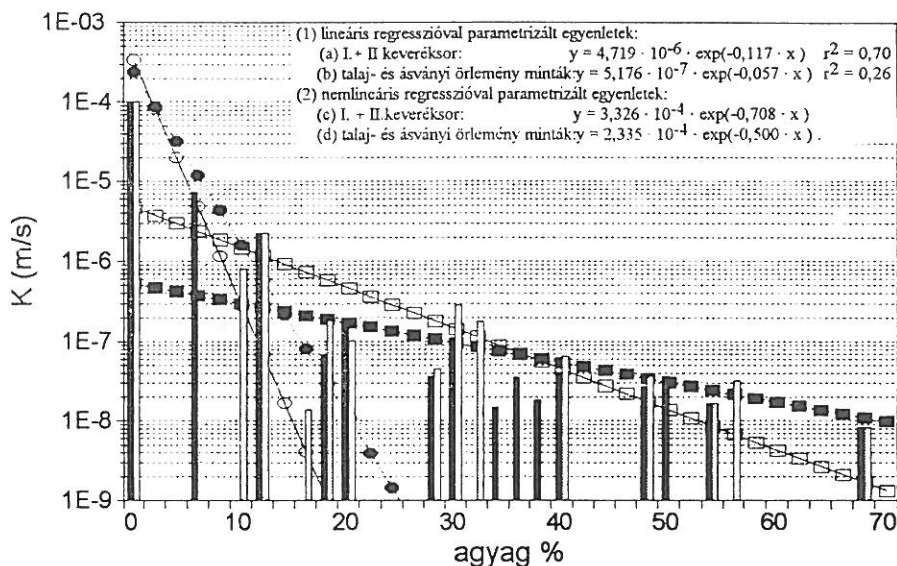
1. ábra

A desztillált vízzel mért hidraulikus vezetőképesség és az agyagtartalom kapcsolata (I-II. keveréksor). Lineáris regresszióval becsült: (a) -□- I.; (b) -■- II. kev.sor. Nemlineáris regresszióval becsült: (c) -o- I.; (d) -•- II. kev. sor. Mért érték: (e) ■■ I.; (f) ■■■ II. kev.sor



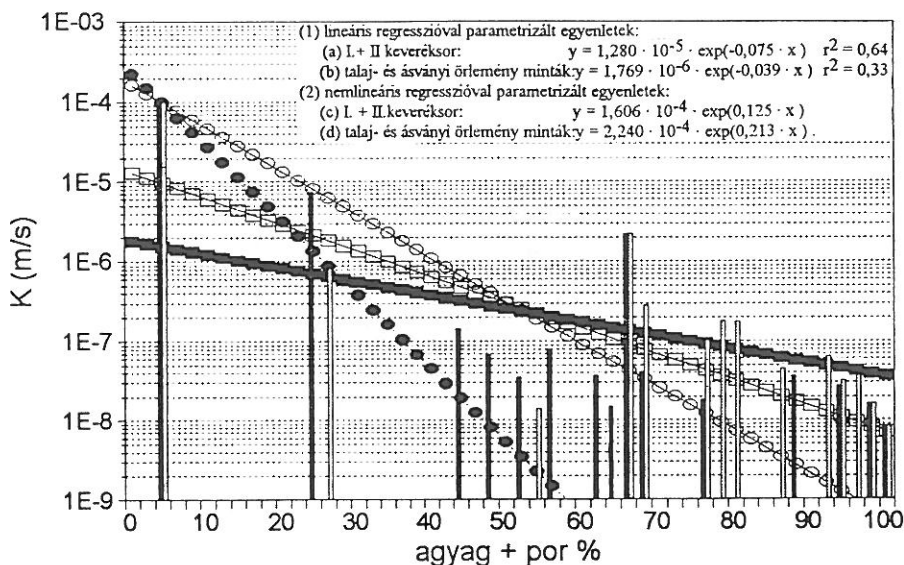
2. ábra

A desztillált vízzel mért hidraulikus vezetőképesség és az agyag + portartalom kapcsolata (I. és II. keveréksor). (a) -(f) lásd 1. ábra



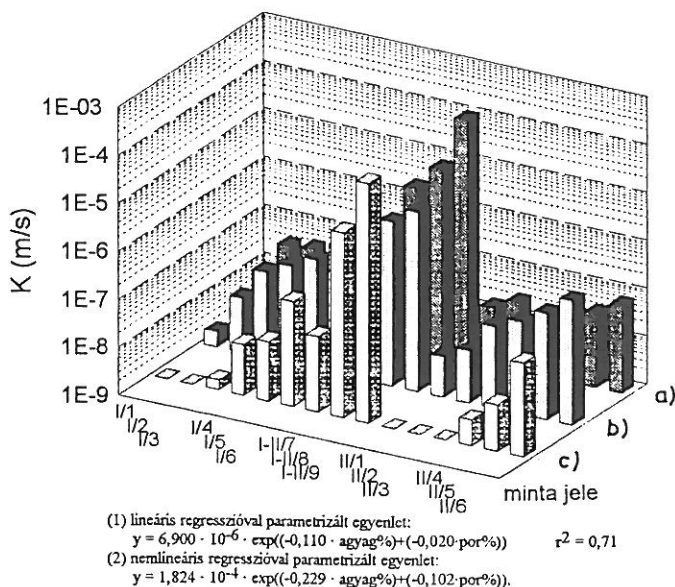
3. ábra

A desztillált vízzel mért hidraulikus vezetőképesség és az agyagtartalom kapcsolata (I-II. keveréksor, valamint talaj- és ásványi örlemény minták). Lineáris regresszióval becsült: (a) -□- I-II. kev.sor.; (b) -■- Talajok. Nemlineáris regresszióval becsült: (c) -o- I-II. kev. sor.; (d) -●- Talajok. Mért érték: (e) ■ I-II. kev. sor.; (f) ▨ Talajok.



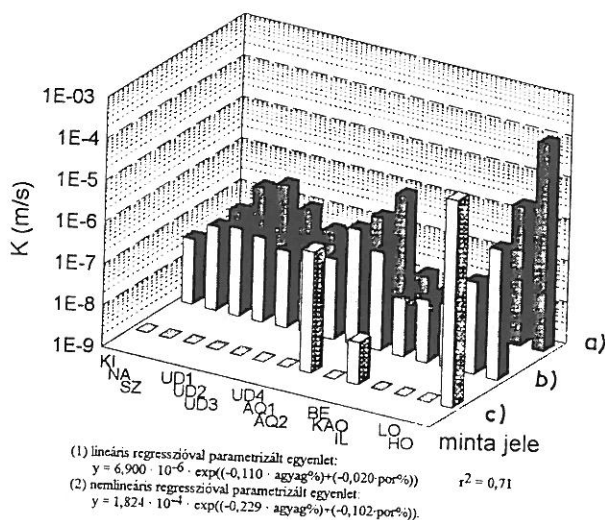
4. ábra

A desztillált vízzel mért hidraulikus vezetőképesség és az agyag + portartalom kapcsolata (I. és II. keveréksor, valamint talaj- és ásványi örlemény minták). (a) -(f) lásd 3. ábra



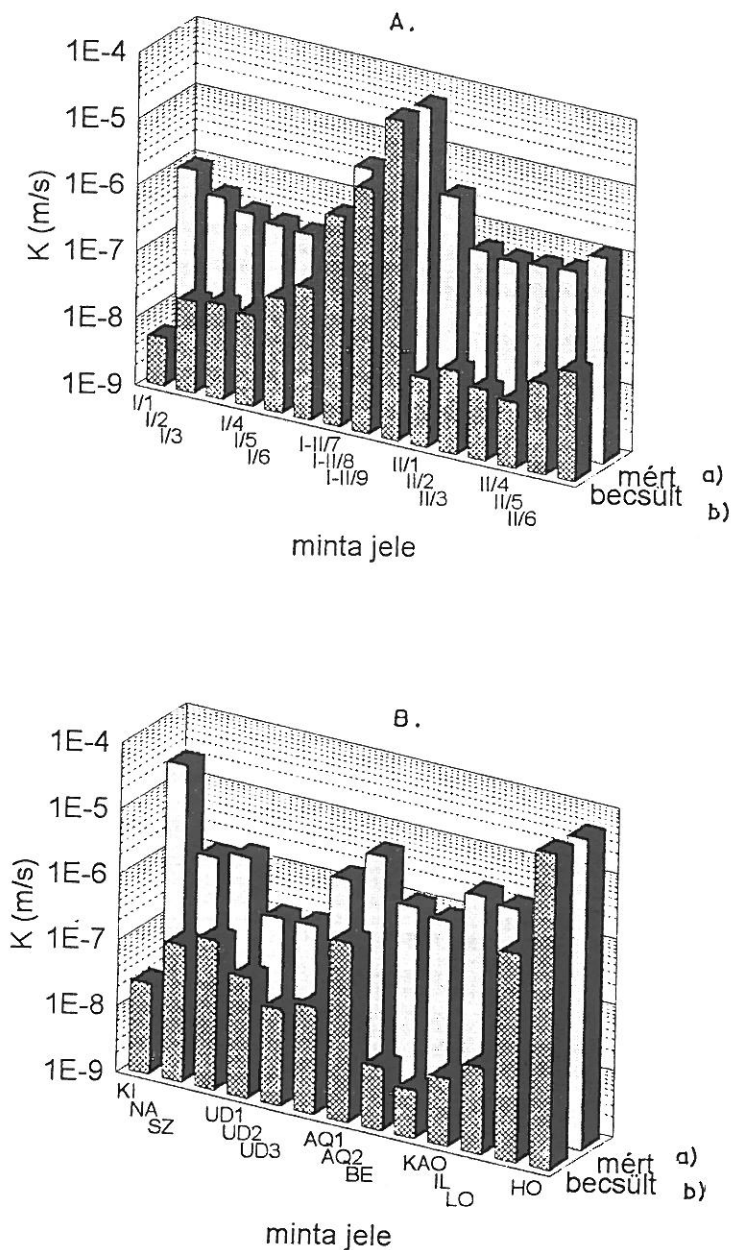
5. ábra

A desztillált vízzel mért (a) hidraulikus vezetőképesség és a lineáris (b), illetve nemlineáris (c) regressziós eljárással parametrizált két független változós egyenletek alapján becsülhető vezetőképesség értékek összehasonlítása (I.-II. keveréksor)



6. ábra

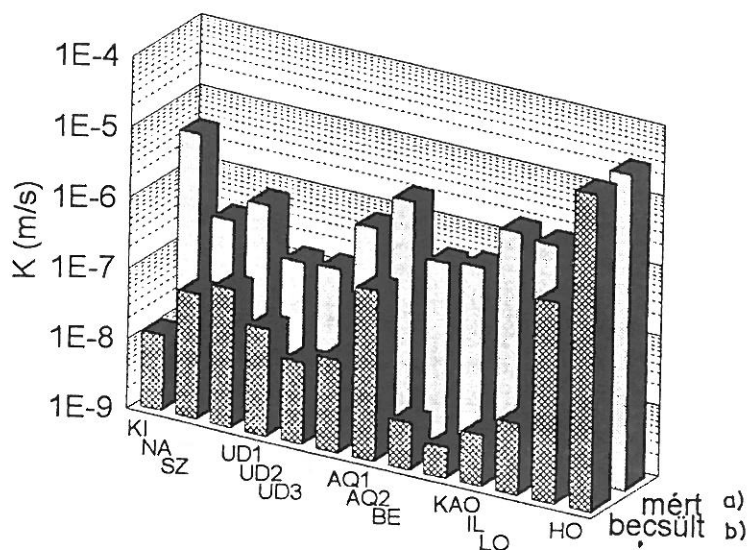
A desztillált vízzel mért (a) hidraulikus vezetőképesség és a lineáris (b), illetve nemlineáris (c) regressziós eljárással parametrizált két független változós egyenletek alapján becsülhető vezetőképesség értékek összehasonlítása (Talaj- és ásványi őrlemény minták)



7. ábra

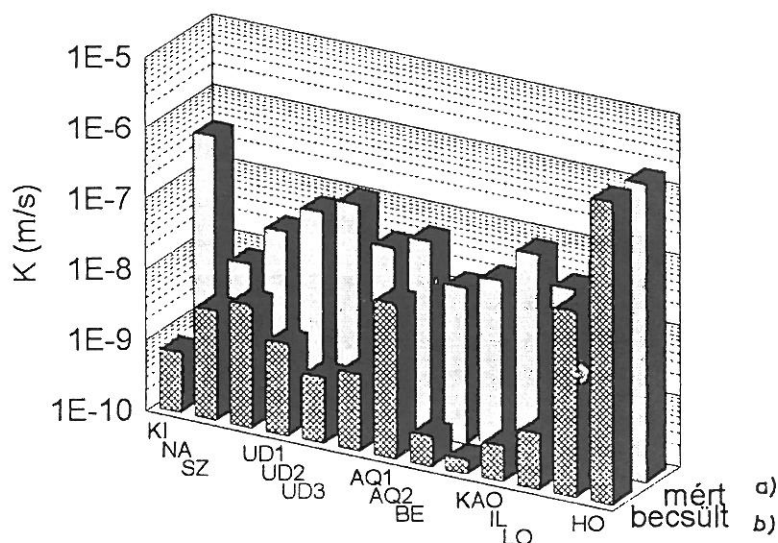
A kerozinnal mért (a), illetve a desztillált vízzel mért értékekből a fajlagos tömeg és a viszkozitás alapján becsült (b) hidraulikus vezetőképesség értékek összehasonlítása.

A. I-II. keveréksor. B. Talaj- és ásványi őrlemény minták



8. ábra

A gázolajjal mért (a), illetve a desztillált vízzel mért értékekből a fajlagos tömeg és a viszkozitás alapján becsült (b) hidraulikus vezetőképesség értékek összehasonlítása. (Talaj- és ásványi őrlemény minták)



9. ábra

A kőolajjal mért (a), illetve a desztillált vízzel mért értékekből a fajlagos tömeg és a viszkozitás alapján becsült (b) hidraulikus vezetőképesség értékek összehasonlítása. (Talaj- és ásványi őrlemény minták)

resszió esetében. Eszerint az agyag- és porfrakció mennyisége együttesen határozta meg ugyan a hidraulikus vezetőképesség nagyságát (mindkettő növekedése a vezetőképesség csökkenését eredményezte), de az agyagtartalom hatása lényegesen nagyobb (lásd az 5-6. ábra egyenleteinél a regressziós koefфициenseket). A fentiek alól kivételt képez a talaj- és ásványi őrlemény minták nemlineáris regresszióval becsült egyenlete, nem tudjuk miért.

A talajkeveréksorokon kerozinnal, a talaj- és ásványi őrlemény mintákon kerozinnal, gázolajjal és kőolajjal mért, illetve a (4) szerint a desztillált vízzel mért értékekből a fajlagos tömeg és a viszkozitás alapján becsült hidraulikus vezetőképességi értékek összehasonlítását a 7-9. ábrán mutatjuk be. Az ábrák alapján nyilvánvaló, hogy a Kozeny-Carman egyenletből levezetett (4) - a durva mechanikai összetételű talajoktól eltekintve - nem alkalmas a vizsgált szerves folyadékok hidraulikus vezetőképességének becslésére.

A hidraulikus vezetőképesség és a mechanikai összetétel (8), (5) és (6) típusú kapcsolatát vizsgálva a talaj- és ásványi őrlemény mintákon (különböző folyadékokat összehasonlítva) azt tapasztaltuk, hogy (5) és (8) a szerves folyadékok esetében igen gyenge ($r^2 = 0.03-0.3$) regressziós összefüggést eredményezett. Értékelhető eredményt csupán a (6) alapján kaptunk, bár ez esetben sem volt túlságosan szoros az illeszkedés (1. táblázat). Mégis, tájékoztatoul elfogadva ezeket a regressziós összefüggéseket érdekes eredményre juthatunk. Míg a desztillált víz esetében a hidraulikus vezetőképesség csökkenését eredményezte az agyag- és a portartalom növekedése (mégpedig a regressziós koefficiensek alapján az agyagtartalom növekedésétől valamivel nagyobb, a portartalom növekedésétől kisebb mértékben függött a vezetőképesség csökkenése), addig a szerves folyadékok esetében mást tapasztaltunk. Ezeknél a folyadékoknál az agyagtartalom növekedése növeli, a portartalom növekedése csökkenti a hidraulikus vezetőképességet. Ezenfelül - a kőolajat kivéve - a portartalom változása erősebben hat a vezetőképesség változására, mint az agyagtartalom változása, amint az a regressziós koefficiensekből kiderül. Ez az eredmény igazolni látszik azt a tapasztalatot, hogy szerves folyadékokkal telített nagy agyagtartalmú talajok esetében a hidraulikus vezetőképesség az agyagszerkezet átrende-

1. táblázat

A különböző folyadékokkal mért hidraulikus vezetőképességi értékek regressziós egyenletei (talaj- és ásványi őrlemény minták)

(1) Folyadék neve	(2) Regressziós egyenlet	(3) r^2
a) Desztillált víz	$y = 1,569 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-0,047 \cdot \text{agyag\%} - 0,031 \cdot \text{por\%})$	0,34
b) Kerozin	$y = 6,083 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(0,054 \cdot \text{agyag\%} - 0,060 \cdot \text{por\%})$	0,41
c) Gázolaj	$y = 3,850 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(0,040 \cdot \text{agyag\%} - 0,065 \cdot \text{por\%})$	0,58
d) Kőolaj	$y = 7,704 \cdot 10^{-8} \cdot \exp(0,030 \cdot \text{agyag\%} - 0,026 \cdot \text{por\%})$	0,06

ződése következtében jelentősen megnő, a durvább fizikai féleségű talajokhoz lesz hasonló (FERNANDEZ & QUIGLEY, 1985; BUDHU et al., 1991).

Az agyag- és portartalom, a folyadék minőség, az agyagásvány-féleség és a humusztartalommal összefüggő szerkezetesség együttes hatását a hidraulikus vezetőképességre kovariancia-analízissel vizsgáltuk (2-3. táblázat). Az analízis eredményei azt mutatják, hogy a vizsgált paraméterek mindegyike jelentősen befolyásolja a hidraulikus vezetőképesség és az agyag-, illetve portartalom közötti regressziós kapcsolatot. Másképpen fogalmazva, az egyes folyadékokra, de az egyes agyagásvány-féleségekre, illetve a különböző mértékben szerkezetes talajminta csoportokra is külön-külön meg kell határozni az agyag- és por-

2. táblázat

A talajkeveréksorok hidraulikus vezetőképességének kovariancia-analízise

(1) Tényező	SQ	FG	MQ
A. Mintacsoportok közötti szignifikancia-vizsgálat			
a) Folyadék	21,97	1	21,97***
b) Agyagásvány minőség	225,9	2	112,95***
c) Folyadék x agyagásvány minőség	47,95	2	23,97***
d) Hiba	295,64	351	0,84
B. Mintacsoportokon belüli közös összefüggés-vizsgálat (hipotézis: a mintacsoportokon belüli regressziós koefficiensek azonosnak tekint- hetők: $b_1=b_2=...b_n$)			
a) Folyadék	20,04	1	20,04***
b) Agyagásvány minőség	144,30	2	72,15***
c) Folyadék x agyagásvány minőség	39,47	2	19,74***
e) Regressziós kapcsolat	139,99	2	69,99***
d) Hiba	155,65	349	0,45
C. A "b" pont hipotézis-vizsgálata ($b_1=b_2=...b_n$)			
a) Folyadék	131,72	1	131,72***
b) Agyagásvány minőség	138,74	2	69,37***
c) Folyadék x agyagásvány minőség	39,47	2	19,74***
f) (Agyag%; por %)	228,32	2	114,16***
g) Folyadék x (agyag%; por%)	17,28	2	8,64***(!)
h) Agyagásvány minőség x (agyag%; por%)	9,59	2	4,79*** (!)
i) Folyadék x agyagásvány minőség x (agyag%; por%)	2,49	2	1,24***(!)
d) Hiba	126,30	343	0,37
D. Következtetés A kiindulási hipotézis ($b_1=b_2=...b_n$) elvetendő (!); a regressziós összefüggéseket mintacsoportonként kell kiszámítani.			

*** P = 0,1 %

tartalomtól függő regressziós görbéket, melyek az egyes csoportokban már a hidraulikus vezetőképesség - agyag- és portartalom összefüggéseket igazolhatóan jellemzik.

3. táblázat

A talaj- és ásványi őrlemény minták hidraulikus vezetőképességének kovariancia-analízise

(1) Tényező	SQ	FG	MQ
A. Mintacsoportok közötti szignifikancia-vizsgálat			
a) Folyadék	581,93	3	193,98***
b) Agyagásvány minőség	426,50	5	85,30***
c) Folyadék x agyagásvány minőség	406,18	15	27,08***
d) Humuszosság	6,42	1	6,42**
e) Hiba	621,35	884	0,70
B. Mintacsoportokon belüli közös összefüggés-vizsgálat			
(hipotézis: a mintacsoportokon belüli regressziós koefficiensek azonosnak tekinthetők: $b_1=b_2=...b_n$)			
a) Folyadék	577,97	3	192,66***
b) Agyagásvány minőség	144,99	5	29,00***
c) Folyadék x agyagásvány minőség	398,93	15	26,60***
d) Humuszosság	2,10	1	2,10 ⁺
f) Regressziós kapcsolat	32,30	2	16,15***
e) Hiba	589,05	882	0,67
C. A "b" pont hipotézis-vizsgálata ($b_1=b_2=...b_n$)			
a) Folyadék	1691,95	3	563,98***
b) Agyagásvány minőség	199,52	5	39,90***
c) Folyadék x agyagásvány minőség	406,06	15	27,07***
d) Humuszosság	1,69	1	1,69 ⁺
g) (Agyag%; por %)	336,23	2	168,12***
h) Folyadék x (agyag%; por%)	36,75	6	6,13*** (!)
i) Agyagásvány minőség x (agyag%; por%)	220,39	4	55,10***(!)
j) Folyadék x agyagásvány minőség x (agyag%; por%)	127,02	12	10,59***(!)
k) Humuszosság x (agyag%; por%)	108,85	2	54,42***(!)
e) Hiba	514,43	873	0,59
D. Következtetés			
A kiindulási hipotézis ($b_1=b_2=...b_n$) elvetendő (!); a regressziós összefüggéseket mintacsoportonként kell kiszámítani.			

*** P = 0,1 %; ** P = 1 %; + P = 10 %

Összefoglalás

Statisztikai módszerekkel vizsgáltuk a talajokat szennyező szerves folyadékok vándorlását leíró modellek által alkalmazott, a hidraulikus vezetőképesség becslésére szolgáló összefüggések alkalmazhatóságát különböző fizikai féleségű, agyagásvány minőségű, humusztartalmú és tömődöttségű talajminták és különféle folyadékok (desztillált víz, kerozin, gázolaj és kőolaj) esetében. Tapasztalataink szerint a vízzel telített talajok vízzel mért hidraulikus vezetőképessége leginkább a talajok százalékos agyag- és portartalma alapján - exponenciális összefüggéssel - becsülhető. Az exponenciális összefüggések paramétereinek meghatározására az alacsonyabb vezetőképességű talajok esetében - az összefüggés linearizálása után - a lineáris regresszió-analízist, nagyobb vezetőképességű talajoknál a nemlineáris regresszió-analízist találtuk megfelelőbbnek.

A szerves folyadékokkal telített talajok ugyanezen folyadékokkal mért vezetőképességének a talajtulajdonságok alapján történő becslésére a fenti összefüggés kevésbé alkalmas. A regressziós egyenleteket tanulmányozva kimutatható volt azonban, hogy a szerves folyadékokkal végzett vizsgálatoknál a minták agyagtartalmának növekedése - a vízzel végzett vizsgálatokkal ellentétben - a hidraulikus vezetőképesség növekedését eredményezte.

Elemzéseink szerint a hidraulikus vezetőképesség agyag- és portartalomtól való függését az egyes folyadékokra, agyagásvány-féleségekre, illetve a különféle mértékben szerkezetes talajminta csoportra külön-külön meg kell határozni ahhoz, hogy az így parametrizált regressziós függvényekkel a vezetőképesség becsülhető legyen.

Megállapítható volt továbbá, hogy az a modellekben széles körűen alkalmazott - becslési eljárás, melynek során a szerves folyadékokkal telített talajok szerves folyadékokkal mért hidraulikus vezetőképességének számítása a vízzel telített talajok vízzel mért vezetőképessége alapján, a folyadékok eltérő fajlagos tömege és viszkozitása figyelembevételével történik, csupán a durva mechanikai összetételű talajoknál alkalmazható, egyéb esetekben hibás eredményekre vezet.

Irodalom

- ANDERSON, J. L. & BOUMA, J., 1973. Relationships between saturated hydraulic conductivity and morphometric data of an argillic horizon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 37. 408-413.
- BEAR, J., 1979. *Hydraulics of Groundwater*. McGraw-Hill Co. New York.
- BENSON, C. H., ZHAI, H. & WANG, X., 1994. Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE. 120. 366-387.
- BOUMA, J. A., JONGERIUS, A. & SCHOONDERBEEK, D., 1979. Calculation of saturated hydraulic conductivity of some pedal clay soils using micromorphometric data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43. 261-264.

- BRAKENSIEK, D. L., ENGELMAN, R. L. & RAWLS, W. J., 1981. Variation within texture classes of soil water parameters. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. **24**. 335-339.
- BUDHU, M. et al., 1991. The permeability of soils with organic fluids. Canadian Geotechnical Journal. **28**. 140-147.
- CAMPBELL, G. S., 1985. Soil Physics with Basic. Development in Soil Science. **14**. Elsevier. Amsterdam.
- CAMPBELL, G. S. & CAMPBELL, M. D., 1982. Irrigation scheduling using soil moisture measurements: Theory and practice. Advances in Irrigation. **1**. 25-42.
- CARMAN, P. C., 1956. Flow of Gases Through Porous Media. Academic Press. New York.
- CARSEL, R. F. & PARRISH, R. S., 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resources Research. **24**. 755-769.
- CONCAWE, 1979. Protection of Groundwater from Oil Pollution. CONCAWE Report No. 3/79. The Hague.
- FERNANDEZ, F. & QUIGLEY, R. M., 1985. Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons. Canadian Geotechnical Journal. **22**. 205-214.
- HEAD, K. H., 1984. Manual of Soil Laboratory Testing. Vol. 2. Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests. Pentech Press. London.
- HEIJDE, VAN DER P. K. M., 1994. Identification and Compilation of Unsaturated/Vadose Zone Models. US EPA. EPA/600/R-94/028.
- HILLEL, D., 1971. Soil and Water. Academic Press. New York.
- KESSLER, A. & RUBIN, H., 1987. Relationships between water infiltration and oil spill migration in sandy soils. Journal of Hydrology. **91**. 187-204.
- KING, J. J. & FRANZMEIER, D. P., 1981. Estimation of saturated hydraulic conductivity from soil morphological and genetic information. Soil Sci. Soc. Am. J. **46**. 419-425.
- KLUTE, A., 1965. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. In: Methods of Soil Analysis. (Eds.: BLACK, C. A. et al.) 210-221. American Society of Agronomy. Madison, Wisc.
- KLUTE, A. & DIRKSEN, C., 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: Methods of Soil Analysis. (Eds.: KLUTE, A. et al.) 687-734. American Society of Agronomy. Madison, Wisc.
- KOZENY, J., 1927. Über kapillare Leitung des Wassers im Boden. Wiener Akademie Wissenschaft. **136** (2a) 271.
- MAKÓ A., 1995. Szerves folyadékokkal telített talajok hidraulikus vezetőképessége. I. Összehasonlító vizsgálatok. Agrokémia és Talajtan. **44**. 181-202.
- MAKÓ A. et al., 1995. Szénhidrogének gőzadszorpciója különféle talajokon. Agrokémia és Talajtan. **44**. 153-180.
- MCKEAGUE, J. A., WANG, C. & TOPP, G. C., 1982. Estimating saturated hydraulic conductivity from soil morphology. Soil Sci. Soc. Am. J. **46**. 1239-1244.
- OLSEN, H., 1962. Hydraulic flow through saturated clays. Clay and Clay Minerals. **11**. 131-161.
- PUCKETT, W. E., DANE, J. H. & HAJEK, B. F., 1985. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. Soil Sci. Soc. Am. J. **49**. 831-836.

- RAWLS, W. J. & BRAKENSIEK, D. L., 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. Proc. Symp. on Watershed Management. 293-299.
- TESTA, S. M. & WINEGARDNER, D. L., 1991. Restoration of Petroleum-contaminated Aquifers. Lewis Publishers. Chelsea, Michigan.
- VÁRALLYAY Gy., 1973. Berendezés bolygatatlan szerkezetű talajoszlopok hidraulikus vezetőképességének meghatározására. *Agrokémia és Talajtan*. **22**. 23-36.
- VÁRALLYAY Gy., 1993. A vízzel telített (kétfázisú) talaj hidraulikus vezetőképességének (K) meghatározása. In: *Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerkönyv. I. A talaj fizikai, vízgazdálkodási és ásványtani vizsgálata.* (Ed.: Buzás I.) 187-204. INDA Kiadó. Budapest.
- WEAVER, J. W. et al., 1994. The Hydrocarbon Spill Screening Model (HSSM). Vol. 2. Theoretical Background and Source Codes. US EPA. EPA/600/R-94/039b.

Érkezett: 1995. január 21.

Hydraulic Conductivity of Soils Saturated with Organic Liquids. II. Possibilities for Estimation

A. MAKÓ

Pannon University of Agricultural Sciences, Keszthely (Hungary)

Summary

The hydraulic conductivity of the soil or of certain soil layers is generally an important input parameter in computerized simulation systems and mathematical models describing the migration, spatial location and possible transformation of the inorganic and organic compounds polluting soils. In the present studies statistical methods were employed to determine the applicability of a number of correlations used by the models for the estimation of hydraulic conductivity in the case of soil samples of various physical types with different clay mineral qualities, humus contents and compactness, and various liquids (distilled water, kerosene, diesel oil and petroleum).

Experience shows that the hydraulic conductivity of soils saturated with water when measured with water can be estimated by means of exponential functions (8), (5) and (6) from the percentage clay and powder contents of the soils (Figs. 1-6). Linear regression analysis after the linearisation of the function was found to be the most suitable means of determining the parameters of the exponential functions in the case of soils with low conductivity (10^{-9} - 10^{-6} m/s), while for those with high conductivity (10^{-6} - 10^{-4} m/s) non-linear regression analysis was preferred.

These correlations are less suitable for the estimation from soil properties of the conductivity of soils saturated with organic liquids measured using the same liquids. Results suitable for evaluation were only obtained with function (6) (Table 1). An examination of the regression equations showed that, by contrast to tests using water,

in studies carried out using organic liquids an increase in the clay mineral content of the samples led to a reduction in hydraulic conductivity.

According to analyses involving covariance analysis, the dependence of hydraulic conductivity on the clay and powder content must be determined separately for each liquid, clay mineral and structured soil sample group if the hydraulic conductivity is to be estimated from regression functions using these parameters (Tables 2-3).

It was also found that the estimation procedure widely used in modelling, whereby the calculation of the hydraulic conductivity of soils saturated with organic liquids and measured using the same liquids is based on the conductivity of water-saturated soils measured using water, taking into account the differing specific masses and viscosity of the liquids (4), is only suitable in the case of soils with coarse mechanical composition and leads to erroneous results in other cases (Figs. 7-9).

Legend to the correlations (in the order of occurrence):

K: hydraulic conductivity; k : actual permeability of the soils; f : viscosity of the liquids; k_0 : constant depending on pore shape (mean value 2.5); T : constant depending on the twistiness of the liquid channels; S_0 : specific surface of the soil grains; n : porosity of the soil; g : specific mass of the permeating liquid; m : dynamic viscosity of the permeating liquid; g : gravity acceleration; K_0 and K_v : hydraulic conductivity of the soil for liquids other than water and for water; m_0 and g_0 : dynamic viscosity and specific mass of liquids other than water; m_v and g_v : dynamic viscosity and specific mass of water; PC and PL: percentage clay and powder fractions in the soil; a , b , c : empirical constants; d : constant proportional to the volume mass of the soils; C : constant (with a value of approx. 270); q_m : maximum water content; q_{wr} : residual, strongly bound water content; I : pore size distribution index; h_{ce} : potential of soil moisture (in cm); PS: percentage sand content; i , j , k : values ranging from 0-2.

Table 1. Regression equations with two independent variables for the hydraulic conductivity values measured with various liquids. (1) Name of liquid. a) Distilled water; (b) Kerosene; (c) Diesel oil; (d) Petroleum. (2) Regression equation. (3) r^2 - determination coefficient.

Table 2. Covariance analysis of the hydraulic conductivities of the soil mixture series. (1) Factor. a) Liquid; (b) Clay mineral quality; (c) Liquid x clay mineral quality. (d) Error. (e) Regression correlation. (f) (Clay %; powder %). (g) Liquid x (clay %; powder %). (h) Clay mineral quality x (clay %; powder %). (i) Liquid x clay mineral quality x (clay %; powder %). A. Significance test between sample groups. B. Combined correlation test within sample groups (hypothesis: regression coefficients within sample groups can be considered identical; $b_1=b_2=\dots b_n$). C. Test on the hypothesis in point b) ($b_1=b_2=\dots b_n$); D. Conclusion: The initial hypothesis ($b_1=b_2=\dots b_n$) cannot be admitted (!); the regression correlations must be calculated for each sample group.

Table 3. Covariance analysis of the hydraulic conductivities of the soil and ground mineral samples. (1) Factor. a)-c) and A-D.: See Table 2. d) Humous; e) Error; f) Regression correlation; g) (Clay %; powder %); h) Liquid x (clay %; powder %); i) Clay mineral quality x (clay %; powder %); j) Liquid x clay mineral quality x (clay %; powder %); k) Humous x (clay %; powder %)

Fig. 1. Relationship between the hydraulic conductivity measured with distilled water and the clay content (mixture series I and II). Estimated by means of linear regression: (a) \square - I.; (b) \blacksquare - II. mixture series. Estimated by means of nonlinear regression: (c) \circ - I.; (d) \bullet - II. mixture series. Measured values: (e) \blacksquare I.; (f) \boxtimes II. mixture series. X-axis: clay %; Y-axis: K hydraulic conductivity (m/s).

Fig. 2. Relationship between the hydraulic conductivity measured with distilled water and the clay+powder content (mixture series I and II). See Fig. 1.

Fig. 3. Relationship between the hydraulic conductivity measured with distilled water and the clay content (mixture series I+II and the soil and ground mineral samples). Estimated by means of linear regression (a) \square - I-II. mixture series; (b) \blacksquare - Soil and ground mineral samples. Estimated by means of non-linear regression (c) \circ - I-II. mixture series; (d) \bullet - Soil and ground mineral samples. Measured values (e) \blacksquare I-II. mixture series; (f) \boxtimes Soil and ground mineral samples.

Fig. 4. Relationship between the hydraulic conductivity measured with distilled water and the clay+powder content (mixture series I+II and the soil and ground mineral samples). See Fig. 3.

Fig. 5. Comparison between the hydraulic conductivity measured with distilled water and the conductivity values estimated on the basis of equations with two independent variables using parameters obtained by linear and non-linear regression (mixture series I+II). a) Measured values; b) Values estimated using linear regression; c) Values estimated using non-linear regression. X-axis: Sample code; Y-axis: K hydraulic conductivity (m/s).

Fig. 6. Comparison between the hydraulic conductivity measured with distilled water and the conductivity values estimated on the basis of equations with two independent variables using parameters obtained by linear and non-linear regression (soil and ground mineral samples). a) Measured values; b) Values estimated using linear regression; c) Values estimated using non-linear regression. X-axis: Sample code; Y-axis: K hydraulic conductivity (m/s).

Fig. 7. Comparison between hydraulic conductivity values measured with kerosene and those estimated from values measured with distilled water on the basis of specific mass and viscosity. A I-II. mixture soils. B. Soil and ground mineral samples. a) Measured values; b) Estimated values; X-axis: Sample code; Y-axis: K hydraulic conductivity (m/s).

Fig. 8. Comparison between hydraulic conductivity values measured with diesel oil and those estimated from values measured with distilled water on the basis of specific mass and viscosity (soil and ground mineral samples). See Fig. 7.

Fig. 9. Comparison between hydraulic conductivity values measured with petroleum and those estimated from values measured with distilled water on the basis of specific mass and viscosity (soil and ground mineral samples). See Fig. 7.